



**Caractérisation spatio-temporelle des échanges  
nappes/rivière à l'échelle de deux grands fleuves  
français : application aux secteurs de  
Donzère-Mondragon (Rhône) et Ecozone du Forez  
(Loire)**

Frédéric Paran, Didier Graillot, Roland Déchomets

► **To cite this version:**

Frédéric Paran, Didier Graillot, Roland Déchomets. Caractérisation spatio-temporelle des échanges nappes/rivière à l'échelle de deux grands fleuves français : application aux secteurs de Donzère-Mondragon (Rhône) et Ecozone du Forez (Loire). Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, Mar 2010, Alexandrie, Égypte. pp.215-222. emse-00477142

**HAL Id: emse-00477142**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00477142>**

Submitted on 22 Oct 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Caractérisation spatio-temporelle des échanges nappes/rivière à l'échelle de deux grands fleuves français : application aux secteurs de Donzère-Mondragon (Rhône) et Ecozone du Forez (Loire)**

PARAN Frédéric\*, GRILLOT Didier et DECHOMETS Roland

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Centre SITE  
158, Cours Fauriel 42 023 Saint-Étienne Cedex 2

### **1. Introduction et objectifs**

L'application de la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE-eau), tant au niveau global qu'au niveau local, impose de mieux connaître le fonctionnement des zones d'interface des hydrosystèmes, notamment fluviaux, et en particulier des zones d'échanges entre eaux souterraines et superficielles (DCEeau, 2006). Pour le SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) du bassin Rhône Méditerranée et Corse, la connaissance de l'évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines représente aussi un enjeu majeur (SDAGErmc, 2009). Cette problématique est également formulée en termes de besoins et d'attentes du programme Plan Rhône : « Qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères » (PR, 2005). De plus, une telle problématique visant à caractériser spatialement les échanges nappes/rivière a aussi une dimension temporelle en lien avec « les changements globaux » et « la prospective changement climatique » à court terme (influence des régimes transitoires au pas de temps saisonniers) ou à long terme (horizon 2100).

La finalité scientifique du projet présenté dans cet article vise à proposer un outil interdisciplinaire pour l'identification et l'évaluation, tant qualitative que quantitative (caractérisation), des échanges entre le fleuve Rhône et ses aquifères superficiels depuis le lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée en tenant compte du caractère anthropisé du fleuve. Un tel outil contribuera à la préservation des nappes phréatiques, patrimoine souterrain et invisible, et plus généralement à la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le bassin du Rhône. Dans un objectif de gestion coordonnée de la ressource en eau tant superficielle que souterraine, et plus généralement de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le corridor alluvionnaire du Rhône, les premiers résultats montrent qu'il est possible : 1) d'estimer la contribution des eaux souterraines au débit du Rhône et d'identifier leur origine ; 2) d'identifier à l'échelle du corridor alluvionnaire, les portions de nappe les plus directement sous influence du fleuve et les plus vulnérables à une pollution du Rhône ; 3) d'identifier les milieux superficiels et humides sous dépendance majoritaire d'apports souterrains ; 4) de transposer la méthode à d'autres cours d'eau comme le fleuve Loire.

Après une brève description des deux secteurs d'étude, suivie d'une présentation synthétique de la méthode de caractérisation des échanges nappes/rivière. Les principaux résultats associés aux deux secteurs d'étude pour deux périodes hydrologiques caractéristiques (hautes-eaux et basses-eaux de nappe) sont présentés. Les aspects novateurs du travail sont ensuite soulignés, avant de conclure.

### **2. Terrains d'étude : du fleuve Rhône au fleuve Loire**

Le Rhône et la Loire sont deux grands fleuves français. Le premier prend sa source en Suisse et traverse la France (environ 600km du nord vers le sud) du lac Léman à son embouchure méditerranéenne, le delta de Camargue. Le second commence sa course dans le Massif Central pour la terminer dans l'Océan Atlantique au niveau de l'estuaire à Nantes après un parcours d'environ 1000km du sud vers le nord, puis d'est en ouest (Figure 1). Le fleuve Rhône est un cours d'eau fortement anthropisé et contraint par de nombreux aménagements. Le secteur étudié est situé à environ 170km au sud de Lyon sur le cours aval du fleuve dans la plaine alluviale du Tricastin entre les villes de Donzère et Mondragon, soit approximativement 20km de long. Le fleuve Loire, quant à lui, s'il a gardé un aspect plus sauvage est néanmoins aménagé, notamment dans la plaine alluviale

du Forez où se situe le second secteur d'étude. L'Ecozone du Forez est localisé à environ 40km au nord de Saint-Etienne entre les villes de Montrond-les-Bains et Feurs sur le cours amont du fleuve, soit environ 10km de long.

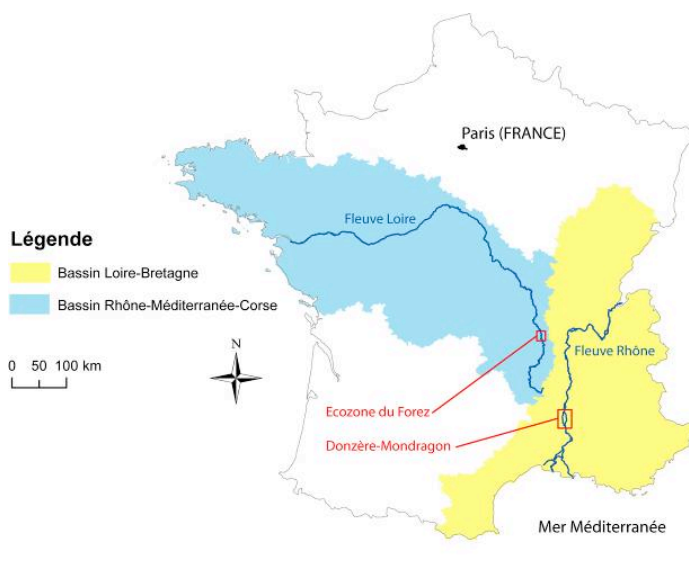


Figure 1. Localisation des deux secteurs d'étude : Ecozone du Forez sur la Loire et Donzère-Mondragon sur le Rhône (Données sources : DB Carthage)

Les deux secteurs diffèrent sur le plan de leurs caractéristiques hydrogéologiques, hydrologiques, climatiques et des contraintes anthropiques. Sur le secteur rhodanien le fleuve et la nappe alluviale sont plus puissants. L'épaisseur de l'aquifère, parfois captif, varie de 7 à 30m, contre 5 à 10m d'aquifère libre pour le secteur ligérien. Le débit moyen du fleuve Rhône est d'environ 1 600m<sup>3</sup>/s (superficie du bassin versant : environ 72 000km<sup>2</sup> à Bourg-Saint-Andéol) contre environ 60m<sup>3</sup>/s pour la Loire (superficie du bassin versant : environ 5 000km<sup>2</sup> à Feurs). Le débit du fleuve à Donzère-Mondragon est fort en mai, juin, juillet, hiver et faible en aout, septembre et octobre. Le débit de la Loire est quant à lui fort au printemps et en automne et faible en été et en hiver. Les deux secteurs sont soumis à une forte pression anthropique :

- Donzère-Mondragon : barrage hydroélectrique au fil de l'eau avec canal de dérivation du fleuve, centrale nucléaire, écluse, digues, canaux, contre-canaux, extraction de granulats, industries, agriculture intensive, forte urbanisation.
- Ecozone du Forez : barrage hydroélectrique de haute chute à l'amont, incision du lit du fleuve suite à l'extraction intensive de granulats, agriculture intensive.

### 3. Méthode de caractérisation des échanges nappe/rivière

La méthodologie interdisciplinaire de caractérisation des échanges nappes/Rhône est fondée sur le croisement de métriques hydrophysiques (hydrogéologie), hydrobiologiques (invertébrés souterrains, macrophytes) et hydrochimiques (chimie classique et isotopique). Cette méthodologie est décrite de manière précise dans les rapports phases 1 et 2 du programme de recherche (Bornette et al., 2007 et 2008). Cet article est focalisé sur la métrique hydrophysique. Elle repose sur une évaluation géométrique des échanges fondée sur l'analyse spatiale SIG (Système d'Information Géographique) et l'infiltration des eaux souterraines dans les alluvions perméables à partir notamment de données piézométriques.

Les interactions hydrauliques entre l'aquifère et la rivière sont estimées à l'aide des gradients de nappe calculés, à l'interface nappe/rivière, à partir de cartes piézométriques numérisées puis digitalisées. Le calcul est fondé sur l'utilisation des outils d'analyse spatiale SIG (ArcGIS 9.2, ArcInfo), et plus particulièrement sur les propriétés des TIN (Triangulated Irregular Network). La fonction « Create TIN from features » permet de générer à partir de données ponctuelles ou linéaires (comme c'est le cas pour les cartes piézométriques) un modelé de surface de la nappe phréatique composé

par un réseau de triangles irréguliers. Chaque triangle contient trois valeurs : la pente, l'altitude et l'angle. Pour une nappe ces trois valeurs deviennent respectivement les suivantes : gradient de nappe, niveau de nappe et sens d'écoulement.

La méthode proposée permet de caractériser les échanges nappe/rivière tout le long de l'interface linéaire (berge), ou polyligne constituée par de nombreux segments. Caractériser les échanges signifie : 1) quantifier le débit échangé ( $Q_f$  exprimé en  $m^3/j$ ) ; 2) identifier les sens de l'échange, par convention  $Q_f+$  indique une alimentation de la rivière par la nappe et  $Q_f-$  une alimentation de l'aquifère par la rivière.

Le débit d'infiltration ( $Q$  exprimé en  $m^3/s$ ) à travers l'interface est calculée, pour chaque segment de la polyligne représentant la berge, avec la loi de Darcy (Equation 1) qui considère le gradient de nappe ( $i$ ) obtenu à partir du TIN de nappe, la section d'échange unitaire ( $A$  exprimée en  $m^2/m$ ) et la perméabilité de l'aquifère ( $K$  exprimé en  $m/s$ ).

$$Q (m^3/s) = K \times A \times i \quad (1)$$

Les sens de l'échange quant à lui est donné par le signe (+ ou -) du sinus de l'angle existant entre le sens d'écoulement de la nappe et celui de la rivière. Cet angle ( $D$ ) est calculé, pour chaque segment de la polyligne de berge, en soustrayant la valeur d'angle du TIN de nappe à celui du TIN de la rivière. De plus, le calcul du débit d'infiltration est pondéré par la valeur du sinus de l'angle  $D$  (Equation 2). En effet, si l'écoulement de la nappe et celui du fleuve sont parallèles ( $D=0^\circ$ ), le débit d'échange ( $Q_p$ ) est considéré comme nul ( $\sin 0=0$ ). Au contraire, si les écoulements sont perpendiculaires ( $D=90^\circ$ )  $Q_p$  est considéré comme maximal ( $\sin 90=1$ ). Pour d'autres valeurs d'angles on a des situations intermédiaires. Par exemple si  $D=45^\circ$  le facteur de pondération est de 0,7.

$$Q_p (m^3/s) = Q \times \sin(D) \quad (2)$$

$Q_p$  est calculé pour chaque segment de la polyligne de berge. L'estimation finale du débit d'échange ( $Q_f$ ) est donnée par l'équation 3. Le débit d'infiltration final ( $Q_f$ ) correspond à la somme du débit ( $Q_p$ ) de chaque segment (1 à  $n$ ) de la polyligne de berge multiplié par la longueur ( $L$ ) de ces segments. Par mesure de commodité pour la manipulation des résultats, les débits d'échange sont exprimés en  $m^3$  par jour.

$$Q_f (m^3/j) = \sum_{(1 \text{ à } n)} (Q_p \times L \times 86\,400) \quad (3)$$

#### 4. Résultats de la recherche

Le projet initié en 2006 et a permis d'aboutir : 1) à plusieurs sectorisations du fleuve Rhône en fonction des données existantes et à des hypothèses sur la caractérisation des échanges nappes/Rhône ; 2) à la schématisation des configurations hydrogéologiques dans lesquelles s'effectuent ces échanges ; 3) à la visualisation des informations obtenues et à la construction de la base de données SIG (Système d'Information Géographique). Sur un secteur test sur le Haut-Rhône les échanges nappes/fleuve ont ensuite été étudiés, ainsi que sur un autre secteur test sélectionné sur le Bas-Rhône.

Cet article présente les résultats obtenus sur le secteur de Donzère-Mondragon (Bas-Rhône) dans le cadre du projet, ainsi que ceux obtenus après transposition de la méthode sur le fleuve Loire et le secteur de l'Ecozone du Forez. Le tableau 1 synthétise les principaux résultats et données utilisées pour les deux secteurs étudiés et pour les deux périodes hydrologiques considérées.

Table 1. Synthèse globale des résultats pour les deux secteurs étudiés et pour les deux périodes hydrologiques considérées : hautes-eaux et basses-eaux de nappe

	Echanges nappe/Loire basses-eaux 2005			Echanges nappe/Rhône basses-eaux 2008		
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	K (m/s)	A (m)	i (‰)
Moyenne	3,13E-03	1,83	2,3	2,00E-03	5,00	0,8
Ecart type	1,47E-03	1,26	2,7	0,00E+00	0,00	0,5
Minimum	1,25E-04	0,03	0,0	2,00E-03	5,00	0,0
Maximum	4,00E-03	4,22	18,1	2,00E-03	5,00	3,1
	$m^3/j$	$m^3/j/km$	L (m)	$m^3/j$	$m^3/j/km$	L (m)
Qf-	-738	-319	2 310	-1 304	-236	5 519

Qf+	5 790	559	10 354	6 312	317	19 932
Echanges nappe/Loire hautes-eaux 2005			Echanges nappe/Rhône hautes-eaux 2009			
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	K (m/s)	A (m)	i (‰)
Moyenne	3,06E-03	1,93	3,9	2,00E-03	5,00	1,6
Ecart type	1,53E-03	1,19	3,7	0,00E+00	0,00	2,2
Minimum	1,25E-04	0,01	0,0	2,00E-03	5,00	0,0
Maximum	4,00E-03	4,40	14,2	2,00E-03	5,00	14,2
	m <sup>3</sup> /j	m <sup>3</sup> /j/km	L (m)	m <sup>3</sup> /j	m <sup>3</sup> /j/km	L (m)
Qf-	-1 057	-401	2 636	-7 411	-590	12 554
Qf+	9 333	922	10 120	19 430	1 082	17 953

Pour le secteur de l'Ecozone du Forez (Loire, Tableau 1), les données utilisées sont issues des travaux de thèse de Mimoun (2004) et de Dauvergne (2007). On dispose ainsi d'une carte de perméabilité des alluvions (K), d'une carte de l'altitude du substratum et de deux cartes piézométriques basses-eaux et hautes-eaux (2005). La carte des épaisseurs mouillées est calculée par soustraction du niveau piézométrique et du niveau du substratum. Ces valeurs correspondent au niveau des berges à la surface d'échange (A) entre l'aquifère et le fleuve. Le gradient de nappe (i) est calculé par analyse géométrique, à l'aide du SIG, pour la rive gauche du fleuve.

Sur ce secteur, les résultats globaux montrent des surfaces d'échanges (A) et des gradients de nappe (i) plus forts en période de hautes-eaux, ce qui n'est pas surprenant. Les gradients hydrauliques moyens au niveau des berges sont nettement supérieurs à la moyenne calculée sur l'ensemble de l'aquifère, aux alentours de 1‰. Ceci est sans doute dû aux phénomènes d'incision du lit. La légère différence sur la perméabilité moyenne est due à une discrétisation légèrement différente en basses-eaux et en hautes-eaux. Les débits échangés totaux (Qf+ et Qf-) sont donnés en m<sup>3</sup>/j pour le linéaire de berge considéré. Il est possible d'exprimer des débits unitaires en m<sup>3</sup>/j/km en fonction de la longueur de berge (L). On observe que les débits unitaires échangés sont plus faibles en période de basses-eaux, notamment dans le sens nappe vers fleuve (Q+) où ils varient d'un facteur 1,65.

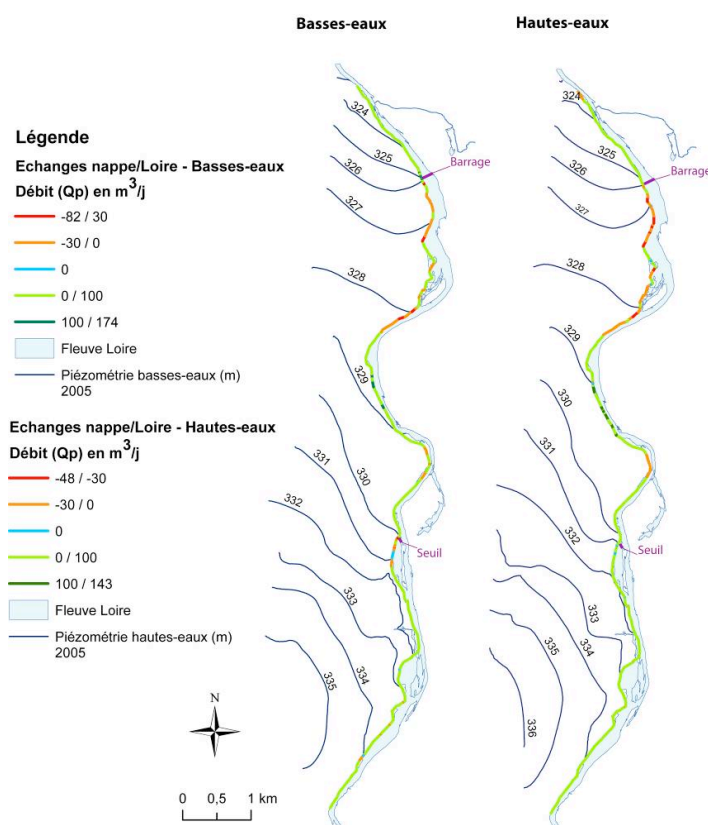


Figure 2. Spatialisation des échanges nappe/Loire

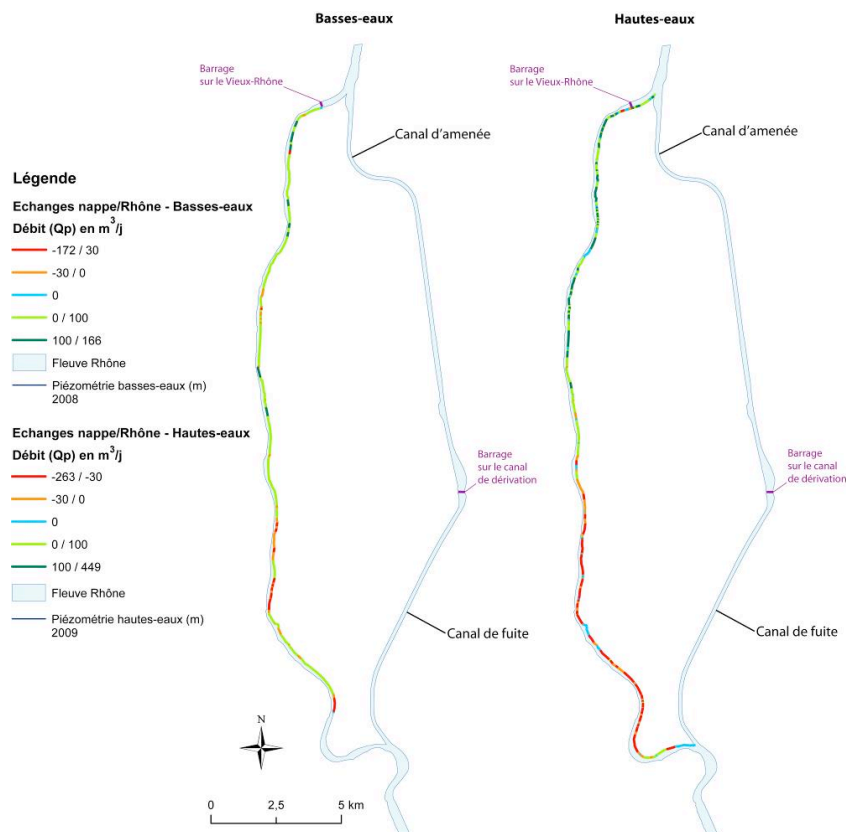


Figure 3. Spatialisation des échanges nappe/Rhône

Pour le secteur de Donzère-Mondragon (Rhône, Tableau 1.), certaines données sont issues des travaux de Guégan (1972) mais sont beaucoup moins précises. On dispose uniquement d'une perméabilité moyenne des alluvions ( $K=2.10^{-3}$  m/s) et d'une épaisseur mouillée moyenne ( $A=5$  m) pour la Plaine du Tricastin. Les cartes piézométriques sont issues des travaux (à l'heure actuelle confidentiels) du bureau d'étude ANTEA pour le groupe AREVA. Le gradient hydraulique ( $i$ ) est obtenu par méthode SIG pour la rive gauche du Vieux-Rhône. Les gradients calculés sont supérieurs en hautes-eaux. Toutefois les gradients hydrauliques moyens au niveau des berges sont du même ordre de grandeur que ceux calculés pour l'aquifère entier, aux alentours de 1‰. Les débits unitaires échangés restent supérieurs en période de hautes-eaux et varient d'un facteur 3,4 de la nappe vers le fleuve, et d'un facteur 2,5 dans le sens inverse.

Les deux secteurs présentent donc un comportement assez proche. En basses-eaux les échanges sont plus intenses sur le secteur de l'Ecozone du Forez, alors qu'en hautes-eaux, ils sont légèrement plus forts pour le secteur de Donzère-Mondragon. Si les gradients de nappes moyens sont inférieurs sur le secteur rhodanien, les perméabilités moyennes sont équivalentes.

La représentation cartographique de ces résultats sur les linéaires de berges concernés permet de spatialiser : 1) le sens des échanges ; 2) l'intensité de ses échanges ; 3) la sectorisation des échanges ; 4) les différences dans le temps à l'échelle saisonnière. Les figures 2 et 3 présentent les résultats spatialisés pour les deux secteurs étudiés et les deux périodes hydrologiques. Les débits d'échanges ( $Q_p$ ) de la nappe vers le fleuve sont représentés en vert (clair et foncé), ceux du fleuve vers la nappe en orange et rouge. Les cartes piézométriques du secteur de Donzère-Mondragon ne sont pas présentées sur la figure 3 du fait de leur caractère confidentiel.

Pour le secteur ligérien (Figure 2.), la nappe alimente le fleuve sur la grande majorité du linéaire de berge. Les échanges s'inversent uniquement sur les secteurs influencés par la présence d'un seuil et d'un petit barrage. Sans ces obstacles sur le fleuve, celui-ci serait un axe entièrement drainant. On note que l'effet du seuil disparaît en période de hautes-eaux.

Pour le secteur rhodanien (Figure 3.), la situation est plus contrastée. En période de basses-eaux, le fleuve draine majoritairement la nappe, sauf sur une petite portion de quelques kilomètres au sud. En période de hautes-eaux, l'alimentation du fleuve par la nappe est plus intense sur la moitié nord. L'inversement des échanges concerne désormais la moitié sud du secteur. Cette inversion est sans doute imputable à l'effet drainant du canal de fuite, creusé dans le substratum, plus marqué en période de haute-eaux car le niveau de base constitué par ce canal varie très peu au cours de l'année. Comme sur la Loire, sans les aménagements, le fleuve constituerait un axe essentiellement drainant pour les deux saisons hydrologiques.

Ce travail montre que la méthode est transposable à d'autres fleuves dans un contexte alluvionnaire. On regrette toutefois de ne pas disposer de données aussi précises sur le secteur rhodanien que sur le secteur ligérien. Ces résultats restent encore à valider en les croisant avec ceux obtenus à l'aide de métriques biologiques et chimiques ou en les comparant à des bilans calculés à partir de modèles mathématiques d'écoulement souterrains.

## 5. Aspects nouveaux

L'aspect novateur de la méthode a été conditionné par l'étendue du terrain d'étude initial (le fleuve Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée) et les contraintes qu'il impose :

- les données disponibles sont fragmentées et hétérogènes dans le temps et dans l'espace. Bien que nombreuses, elles sont éparses, lacunaires, parfois anciennes, souvent empreintes d'incertitudes, généralement asynchrones, de sources variées et parfois confidentielles.
- les configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges résultent d'une histoire géologique complexe. Elles sont donc diverses et peuvent mettre en jeu différents types d'aquifères (alluviaux, cristallins fissurés, massifs calcaires karstifiés ou non...) et des contextes variés.
- les aménagements anthropiques sont nombreux. Qu'il s'agisse de centrales nucléaires, de barrages hydroélectriques, de canaux de dérivation, d'écluses, de contre-canaux, de pompages en nappes pour l'eau potable, l'agriculture ou l'industrie : ces ouvrages influencent les échanges nappes/Rhône.

Face à de telles contraintes et sur un territoire aussi vaste, la modélisation globale des échanges nappes/rivière, bien qu'envisageable, reste difficile. L'utilisation de modèles locaux, quant à elle, est coûteuse en temps de travail et n'est possible que si les données existent ou sont disponibles. Nous nous sommes donc orientés vers une méthode permettant de tirer le meilleur parti des données existantes (avant d'en acquérir de nouvelles) et une mise en œuvre moins lourde que les modèles mathématiques, fondée sur les outils SIG d'analyse spatiale.

Au final, la méthode mise en œuvre est simple, peu coûteuse en temps, reproductible, adaptable aux différentes contraintes qu'impose un territoire aussi vaste. Elle permet de plus par sa souplesse de choisir l'échelle à laquelle les échanges sont calculés. Les valeurs obtenues peuvent ainsi être agrégées sur des portions de berges prédéterminées. Ceci permet par exemple de calculer les échanges hydrauliques pour des configurations hydrogéologiques homogènes pour chaque berge de la rivière.

## 6. Conclusion

La méthode d'analyse géométrique mobilisée permet de calculer des débits d'échange nappes/rivière sur certains secteurs du Rhône. La généralisation de cette méthode à l'échelle du Rhône n'est possible que dans les secteurs alluvionnaires perméables. Cependant, il est nécessaire de disposer d'un nombre de données d'entrée minimum pour obtenir des résultats satisfaisants. Il s'agit :

- de cartes piézométriques datées postérieures à l'aménagement CNR et calées NGF.
- de cotes d'altitudes du fleuve, des îlots ou des contre-canaux à la même date.
- des champs de perméabilités précis pour déduire la perméabilité à l'interface nappe/rivière.
- des profils bathymétriques et des largeurs du fond du fleuve, des îlots ou des contre-canaux ou des cartes du substratum pour estimer au mieux la surface d'échange avec la nappe.

La méthode d'identification et de quantification des échanges par analyse spatiale sous SIG présente les avantages suivants :

- elle est reproductible secteur après secteur sous réserve d'obtention des données nécessaires.
- elle est souple d'utilisation car des données acquises ultérieurement peuvent être intégrées dans la base de données pour le calcul des débits.
- elle permet de réaliser des bilans à différentes échelles par agrégation des valeurs de débits sur les segments de berge. Ceci sera très pratique pour travailler à des échelles compatibles avec les résultats obtenus à l'aide d'indicateurs biologiques et géochimiques.

Il conviendra aussi d'évaluer au mieux les incertitudes pesant sur le calcul des débits et des gradients de nappe. En effet, la généralisation de la méthode demande au préalable une évaluation de la marge d'incertitude induite par les incertitudes de chacune des variables servant au calcul des débits et des gradients de nappe.

A terme, les résultats obtenus fourniront des éléments d'information appréciables pour la préservation de l'eau pour usages anthropiques (ex : Alimentation en eau potable, dimensionnement des captages, réalimentation de nappe...) et alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines (ex : maintien de débit et tamponnage thermique des eaux de surface, limitation de l'assèchement estival, maintien de milieux oligotrophes...) en vue de la prévention des conflits d'usage. Les éléments acquis apporteront également des indications utiles pour la poursuite de programmes de restauration des milieux aquatiques. Le caractère générique de la méthode permet d'ores et déjà de l'appliquer à d'autres fleuves, ou rivières, sous réserve de la disponibilité des données piézométriques.

### Références bibliographiques

Bornette, G., R. Dechomets, M. Dufour, D. Ferreira, A. Germain, J. Gibert, D. Graillot, C. Jezequel, M. Lafont, P. Marmonier, F. Paran, C. Piscart, S. Puijalon et L. Simon, 2008, Evaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface, application au fleuve Rhône et à ses aquifères associés. Rapport final phase 2, action recherche valorisation ZABR, AE-RMC, ENSM-SE, UCBL Lyon 1, CEMAGREF Lyon, CNR, 113p.

En ligne : <http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

Bornette G., R. Dechomets, D. Ferreira, A. Germain, J. Gibert, D. Graillot, M. Lafont, F. Paran et S. Puijalon, 2007, Evaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface, application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport final phase 1, action recherche valorisation ZABR, AE-RMC, ENSM-SE, UCBL Lyon 1, CEMAGREF Lyon, 167p.

En ligne : <http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

Dauvergne F., 2007, Méthodes de discrétisation pour la modélisation par éléments analytiques en hydrogéologie quantitative - Application aux écoulements en régimes permanents transitoires. Mémoire de thèse de doctorat, ENSM-SE.

DCEeau., 2006, Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

En ligne : [http://europa.eu.int/eur-lex/pri/fr/oj/dat/2000/L\\_327/L\\_32720001222fr00010072.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/pri/fr/oj/dat/2000/L_327/L_32720001222fr00010072.pdf)

Guégan B., 1972, Tritium et bilan hydrogéologique en cas de pollution de la nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse). Thèse de Géodynamique externe (hydrogéologie), Université Paris VI.

Mimoun D., 2004, Spatialisation de l'information : une aide à l'analyse hydraulique et paysagère développée lors de la réhabilitation de sites postindustriels, cas des réaménagements des gravières en eau en milieu alluvionnaire. Mémoire de thèse de doctorat, ENSM-SE.

En ligne : <http://www.emse.fr/site/themerecherche/dmimoun.pdf>

PR., 2005, Plan Rhône, Un projet de développement durable. DIREN RA, Délégation de bassin Rhône Méditerranée.

En ligne : <http://www.rhone-alpes.ecologie.gouv.fr/>

SDAGErmc., 2009, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône Méditerranée et Corse.

En ligne : <http://siecorse.eaurmc.fr/sdage/sdage.php>

### Remerciements



Le travail effectué sur le Rhône constitue une action de recherche interdisciplinaire, labellisée « Plan Rhône », soutenue par la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), en partenariat avec la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) et financée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (AE-RMC) et la région PACA (Provence Alpes Côte d'Azur). Celui réalisé sur la Loire s'intègre dans un projet de recherche du programme PLGN 3 (Plan Loire Grandeur Nature 3) piloté par l'EPL (Etablissement Public Loire) et financé par le FEDER (Fond Européen de Développement Régional). Les données piézométriques utilisées sur le secteur de Donzère-Mondragon sont issues des travaux du bureau d'étude ANTEA pour le groupe AREVA. Celles du secteur de l'Ecozone du Forez sont issues de travaux réalisés au centre SITE de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne en collaboration avec la FRAPNA Loire.